

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.48 NO.3 September 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 3 号 (Vol. 48, No. 3), 2009 年 9 月 (September 2009)

目 次 (CONTENTS)

1. 消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の静水面波圧に及ぼす影響
..... 関 克己・有川 太郎・水谷 雅裕 3
(Influence on Wave Pressures of Wave-Dissipating Block state on Breakwater with Wave-Dissipating Block Layer
..... Katsumi SEKI, Taro ARIKAWA, Masahiro MIZUTANI)

2. ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元に関する考察
..... 平山 克也・春尾 和人・宮里 一郎 23
(Evaluation of Design Wave Condition for Seawall on Coral Reef Calculated in Boussinesq-type
Wave Transformation Model
..... Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO, Ichiro MIYAZATO)

消波ブロック被覆堤における消波工被覆状態の静水面波圧に 及ぼす影響

関 克己*・有川 太郎**・水谷 雅裕***

要 旨

海岸構造物の設計方法が仕様規定型から性能規定型への移行にあたり、より精度の高い設計・性能照査方法として変形を考慮した設計法の研究が進められている。また、信頼性設計は外力を確率的に表現することが求められている。しかしながら、変形を考慮すること、および外力を確率的に表現することは、既往の設計公式ではほとんど考慮されていない内容である。

本研究では消波ブロック被覆堤の消波工断面が完成断面と異なる状況を想定し、被覆状態を変化させながら波圧に及ぼす影響について実験的に検討を行った。また波圧実験データを確率的に検討した。

今回の研究により得られた結論を以下に示す。

- 1)消波工の被覆状態は、波圧増大に大きな影響を及ぼし、特に天端高が静水面付近および静水面下にある場合、不完全被覆の消波工が高マウンドとして影響するために、衝撃砕波が発生し、静水面における波圧は、消波工被覆無しの場合に対して3倍以上に増大する。
- 2)衝撃砕波発生時は、静水面上の波圧 p_1 は波高の2乗に比例する挙動となる。
- 3)周期が長い場合には、消波工の被覆状態の影響を受け難くなる。
- 4)衝撃砕波の発生条件、波圧の増大率は消波工の体積のみでなく、その形状に大きく影響を受ける。
- 5)消波工が完全被覆の状態であれば、規則波実験における変動係数は0.1程度であり、モンテカルロ法などに用いられる標準値と一致するが、不完全被覆状態では0.3~0.5程度に上昇する。

キーワード：消波ブロック被覆堤，消波工，不完全被覆，波圧，波圧最大値出現確率

* 海洋・水工部海洋研究領域耐波研究チーム特別研究員

** 海洋・水工部海洋研究領域耐波研究チーム主任研究官

*** 海洋・水工部海洋研究領域耐波研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail:seki-k@pari.go.jp

Influence on Wave Pressures of Wave-Dissipating Block state on Breakwater with Wave-Dissipating Block Layer

Katsumi SEKI*

Taro ARIKAWA**

Masahiro MIZUTANI***

Synopsis

Reliability design of maritime structures based on the deformation level will be one of the most important future design tools. However, it has not been fully applied to actual design since it is very difficult to take the various design condition into account. The present paper points out on the basis of the experimental results, the influences of the state of wave-dissipating blocks on the wave pressures at several cross sections of a breakwater, and the stochastic characteristics of obtained data was examined.

The main conclusions of this paper are as follows:

- 1) The covering condition of wave-dissipating blocks makes a significant influence of the wave pressure acting on the block layer. The impulsive wave pressure is easily exerted when the crown height of wave-dissipating block layer become lower than the sea level. The maximum wave pressure becomes 3 or more times larger than that in case without any dissipating block layer.
- 2) When the impulsive wave breaking is generated, wave pressure p_1 on the still water level becomes proportional to the square of the wave height.
- 3) When the wave period is long, the influences of state of covered blocks are decreased.
- 4) The condition for generating the impulsive wave pressure and the amplified ratio of wave pressure by breaking is influenced by the cross section of breakwater as well as the volume of block layer.
- 5) The coefficient of amplification factor of wave pressure is about 0.1 when it agrees to the reference value used for Monte Carlo simulation at completely covered breakwater. However, at incomplete wave-dissipating block layer, the coefficient of amplification factor is increased about 0.3 to 0.5.

Key Words: wave-dissipating blocks, incomplete covered, wave pressure, probability distribution of wave pressure

* Member of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department
** Senior Researcher, Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department
*** Head of Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 e-mail:seki-k@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	7
2. 消波工の不完全被覆状態に対する既往の取り扱い方	8
2.1 塩見ら(1994)による取り扱い方	8
2.2 高橋ら(2000)による取り扱い方	9
3. 消波工の被覆状態による衝撃波圧の発生とその大きさに関する規則波実験	9
3.1 実験概要	9
3.2 被覆状態の波圧時系列波形への影響	10
3.3 静水面での波圧最大値に対する影響	12
3.4 消波工の被覆状態と衝撃波圧発生条件	14
4. 規則波実験による静水面での波圧最大値の出現確率に関する検討	15
4.1 入射波高に対する波圧最大値の平均値について	15
4.2 標準偏差と変動係数について	17
4.3 出現確率分布について	18
5. 結論	19
6. あとがき	20
謝辞	20
参考文献	21
記号表	21

1. まえがき

消波ブロック被覆堤など、堤体前面に消波工を施工した外郭施設において、その消波工が不完全な状態において衝撃波圧が発生し、消波工を施工しなかった場合に比べて大きな波圧が堤体に作用する場合があります、これが原因となり、堤体の滑動・破損等の被災をもたらすことがあります。写真-1, 2は2008年11月7日から北海道を通過した低気圧に伴う高波浪により被災した留萌港西防波堤の写真である。写真-1にある様に被災箇所は堤頭部あり、かつ消波工の天端が下がっていた箇所において上部工のコンクリートが剥離されていることが分かる(写真-2)。

消波工の不完全被覆状態は、施工後の完成断面から沈下・散乱等の消波工の変形により発生する(五明ら, 1995, 1997)他に、消波工施工途中、堤頭部などの平面不連続部においても発生する。

消波工の不完全状態に関する研究は、施工途中断面を想定したものとして、鴻上・時川(1970)、平面不連続部を対象としたものとして塩見ら(1994)、消波工天端が下がった状況を想定したものとして高橋ら(2000)があり、また「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(以下、技術基準と呼ぶ)には、消波工の平面不連続に伴う不完全状態の取扱い方法として塩見ら(1994)による手法が示されている。それぞれの研究は特定の状況を想定したものであり、統一的に検討したものではない。

一方で技術基準の改定に伴い、構造物の設計方法が仕様規定型から性能規定型へと変更となり、その中の要求性能として「施工性」、「修復性」、「維持管理性」が挙げられている。これらの性能は施工途中、もしくは消波工断面の変形と密接に関係するものであり、また、より精度の高い設計方法として実務への導入が期待されている

変形を考慮した設計法の研究に直結するものである。下迫ら(1998, 2006)は、モンテカルロ法に基づく数値シミュレーションにより供用期間中の期待滑動量(総滑動量の平均(期待)値)を算定し、これを指標とするような新しい設計方法を提案している。このような変形を考慮した設計方法を消波ブロック被覆堤に応用する場合には、消波工変形後の性能を把握することが必要である。

また、技術基準の改定に伴った設計方法の大きな変更点として、確率論に基づく設計法の導入がある(高山ら, 1994, 合田, 2008)。この場合には、外力および耐力に関して確定値として取り扱うのではなく、不確定性を含んだ確率分布として考えていく必要がある。特に衝撃波圧など規則波実験においてもバラツキが大きい現象を確定値として取り扱うことは問題があると考えられる。

本研究では、消波ブロック被覆堤の消波工の変形に着目し、消波工の被覆状態が波圧に及ぼす影響について検討する。また、規則波の波圧実験における波圧最大値の出現確率分布を検討することにより、波圧最大値の変動係数に関する検討を行う。

はじめに2.において消波工の不完全被覆状態の波圧・波力の算定方法に関する既往の手法を紹介する。

3.では、規則波による断面実験に基づき、消波ブロック被覆堤における消波工の被覆状態が波圧に及ぼす影響、特に衝撃波圧の発生条件、およびその時の波圧最大値の大きさについて実験的に明らかにする。本研究では消波工の被覆状態に関して、特定の状況を想定するのではなく、系統立てて被覆状態を変化させての実験を行う。なお、ここでは静水面における波圧について検討していく。静水面における波圧強度は現在の設計公式において最も重要な指標であり、鉛直分布を考える際の基準となるものであるからである。



写真-1 留萌港西防波堤被災状況，被災部正面
(2008年11月28日撮影)



写真-2 留萌港西防波堤被災状況，被災部背面
(2008年11月28日撮影)

4.では3.で示した実験データを基にして、規則波による波圧実験に基づく波圧最大値の出現確率分布を算定することにより、波圧最大値の変動性・確率分布について検討する。

2. 消波工の不完全被覆状態に対する既往の取り扱い方

消波ブロック被覆堤の消波工が不完全被覆状態においては、被覆しない場合に比べ、波圧・波力増大が発生することは古くから知られており、技術基準にも示されている。また、技術基準の中では、消波工の平面不連続部の波圧・波力算定手法として塩見ら(1994)の方法が示されている。

一方で、高橋ら(2000)では上部工の被災原因の検討として消波工の天端高が上部工天端まで達していない状況での実験を行い、衝撃碎波力が発生することを確認し、また、波圧公式を提案している。

両者の論文とも、水理模型実験を行い、その結果に基づき、それぞれ平面不連続部および消波工の天端高が下がった場合においての、波圧算定手法を提案している。以下のその詳細を示す。

2.1 塩見ら(1994)による取り扱い方

塩見ら(1994)では、現地被災事例を基に消波工の堤頭部もしくは平面不連続部における波力増大の特性の把握および設計波力算定方法の提案のため、平面実験を行っている。

ここで提案された手法は図-1に示すように消波工が平面的に不連続になる状況を分割して考え、その分割された断面において、消波工をマウンド(高マウンドの状態)

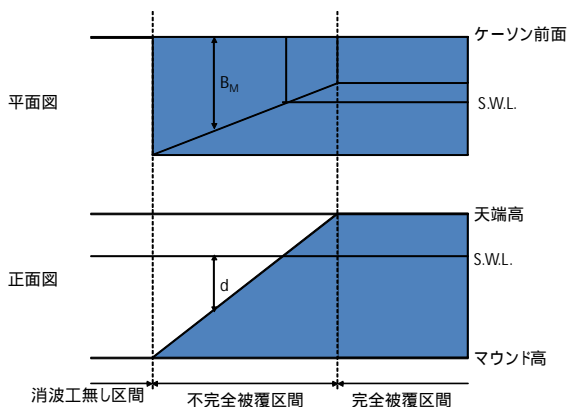


図-1 塩見ら(1994)による消波工不連続部の取扱い方法

と想定し、現在設計で用いられている衝撃波圧を考慮した波圧公式を適用する方法である。ここでは静水面における設計波圧 p_1 について式を示す。

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \theta) w_0 H_D \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + 0.5 \left\{ \frac{\frac{4\pi h}{L_D}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L_D}\right)} \right\}^2 \quad (2)$$

$$\alpha^* = \max(\alpha_2, \alpha_1) \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \left(1 - \frac{d}{h_b} \right) \frac{\left(\frac{H_D}{d} \right)^2}{3}, \frac{2d}{H_D} \right\} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \alpha_{11} \quad (5)$$

$$\alpha_{10} = \begin{cases} \frac{H_D}{d} & H \leq 2d \\ 2 & H > 2d \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha_{11} = \begin{cases} \frac{\cos \delta_2}{\cosh \delta_1} & \delta_2 \leq 0 \\ 1 & \delta_2 > 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{0.5}} & \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 20\delta_{11} & \delta_{11} \leq 0 \\ 15\delta_{11} & \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 4.9\delta_{22} & \delta_{22} \leq 0 \\ 3\delta_{22} & \delta_{22} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta_{11} = 0.93 \left(\frac{B_M}{L_D} - 0.12 \right) + 0.36 \left(\frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (10)$$

$$\delta_{22} = -0.36 \left(\frac{B_M}{L_D} - 0.12 \right) + 0.93 \left(\frac{h-d}{h} - 0.6 \right) \quad (11)$$

ここで、 θ : 波向き、 λ_1, λ_2 : 構造形式に応じた補正係数、 w_0 : 水の単位体積重量、 H_D : 設計波高、 L_D : 設計波長であり、 h : 防波堤前面の水深、 d : 被覆ブロック上の水深、 h_b : 防波堤の壁面から $5H_{1/3}$ 沖側の地点の水深、 B_M : マウンド天端幅である。また、 α_1, α^* はそれぞれ重複波成分、碎波圧および衝撃波圧を示す波圧係数である。つまり塩見ら(1994)による手法では、分割した断面毎に d, B_M が変

化し、衝撃波圧に関する係数 α^* を補正することになる。

図-2にこの手法による算定結果の例を示す。横軸は消波工の天端高の変化を示しており、静水面より低い場合($d/h=0.2$)で波圧が最大となる。また $0.1 < d/h < 0.3$ の状況において衝撃砕波が発生することになる。

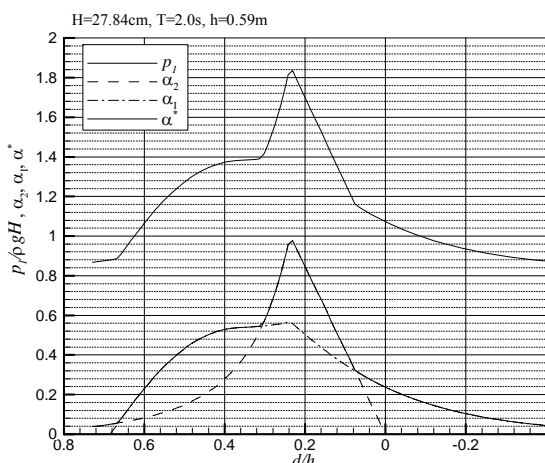


図-2 断面分割法算定結果例
(水深 0.59m, 波高 27.84cm, 周期 2.0s)

2.2 高橋ら(2000)による取り扱い方

高橋ら(2000)では、1999年9月24日に九州・中国地方を襲った台風9918号により被災した周防灘での被災事例の検討した際に、護岸前面における消波工が上部工のパラペットの下端部までしか設置されていないなかった護岸が被災していることに着目し、消波工の天端高が上部工天端より低い場合について実験を行っている。

その結果として、消波工の天端高が低く不完全の状態では消波工天端付近に衝撃的な波力が作用し、上部工、特にパラペット部の倒壊被害の原因となったことを指摘している。また、その実験結果から衝撃砕波力が作用する領域を定義(図-3参照)して波圧鉛直分布を算定する手

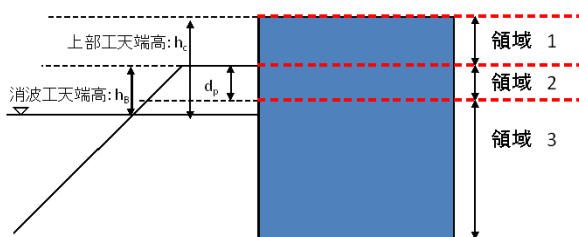


図-3 高橋ら(2000)による消波工不連続部の取扱い方法

法を提案している。

$$d_p = \min \left[\frac{H_{1/3}}{3}, (h_C - h_B) \right] \quad (12)$$

ここで、 h_B :消波工の天端高、 h_C :上部工天端高である。

3. 消波工の被覆状態による衝撃波圧の発生とその大きさに関する規則波実験

本章では、規則波による断面実験を行うことにより、消波ブロック被覆堤における消波工の被覆状態の波圧に及ぼす影響について検討を行う。

本研究では、平面不連続部もしくは消波工の天端が下がった場合など、特定の状況を再現するのではなく、鉛直方向の変化である天端高が変化する場合と、水平方向の変化である被覆厚さが変化する場合とに分けて、消波工の被覆状態を系統立てて変化させて実験を行った。

3.1 実験概要

(1) 実験水路および断面

先に述べたように、消波ブロック被覆堤における、消波工の被覆状態に関して、天端高を変化させた場合、被覆圧を変化させた場合について実験を行う。

実験は105m水路(長さ105m,幅3m,高さ2.5m)において行った。図-4に実験水路図面および波高計の設置状況を示す。図-4にあるようにこの水路は途中から幅0.8mので、側面に観測窓を有する主水路と、幅2mの副水路に分割されており、今回の実験では主水路を使用した。

実験を行った消波ブロック被覆堤の基本となる完成断面は、天端2層積みの消波ブロック被覆堤(図-5(a)のcase01)であり、この完成断面を基準とし、天端高を下げた場合、被覆厚を薄くした場合の断面を作成する。図-5(a)に天端高を変化させた場合、図-5(b)に被覆厚を変化させた場合についての実験断面を示す。なお、消波工

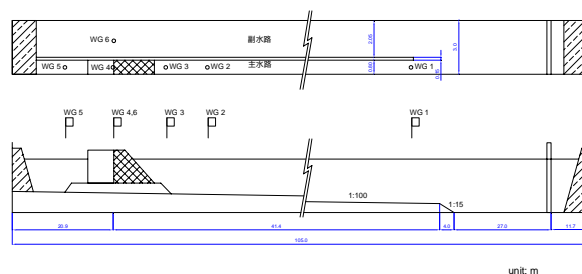


図-4 実験水路(105m水路)概要図

した波圧計(設計公式での p_1 に対応)における、波圧時系列の比較を示す。

図-6には波高27.84cm, 周期2.0sのケースにおける静水面での波圧時系列を示す。図-6(a)は天端高を変化させた場合、図-6(b)は被覆厚を変化させた場合である。なお比較のため2つの図面それぞれに、消波工無しの場合(case00), 完全被覆の場合(case01)を示している。

まず、天端高を変えた場合(図-6(a))を見ると、今回の実験は水深0.59mであり、case03がほぼ静水面と天端高が一致するケース、case02は消波工天端が静水面上にある場合、case04～case06は消波工天端が静水面下にある場合である。図から分かるように、消波工天端高が下がるにつれて、波圧波形の前面の立ち上がりが鋭くなり、衝撃的な波圧が作用していることが分かる。衝撃波圧発生時は、

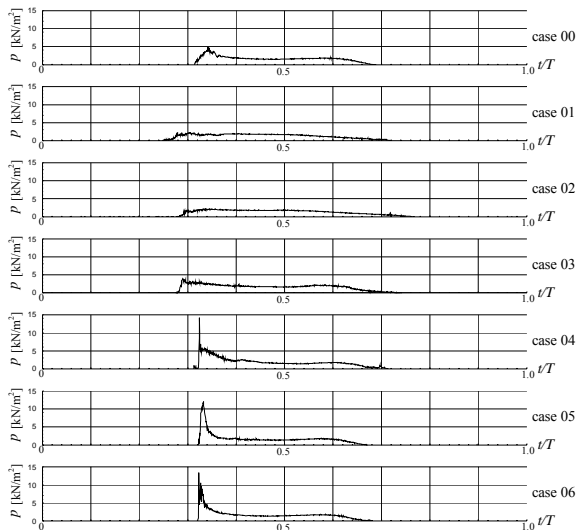


図-6(a) 静水面に設置した波圧計時系列
(H=27.84cm, T=2.0s, 天端高を変えた場合)

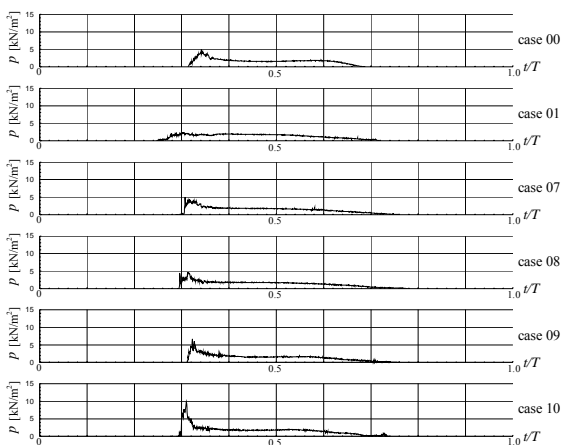


図-6(b) 静水面に設置した波圧計時系列
(H=27.84cm, T=2.0s, 被覆厚を変えた場合)

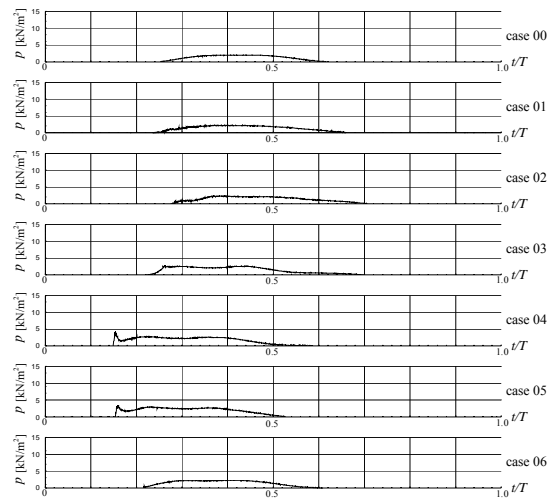


図-7(a) 静水面に設置した波圧計時系列
(H=30.14cm, T=3.0s, 天端高を変えた場合)

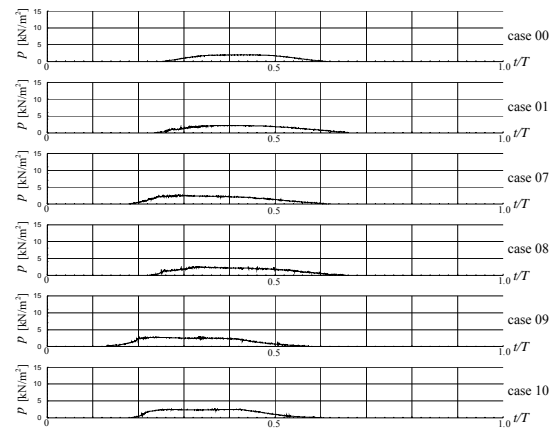


図-7(b) 静水面に設置した波圧計時系列
(H=30.14cm, T=3.0s, 被覆厚を変えた場合)

消波工無しの場合と比較すれば、最大値で3倍程度の大きさが発生している。

一方で、被覆厚を変化させた場合(図-6(b))では、被覆厚が薄くなることにより、波圧最大値の増加は見られるものの、天端高を変化させた場合に比較してその増加傾向は緩やかであり、case10を除き衝撃波圧が発生していない。

周期を変えた場合の実験データを図-7, 図-8に示す。図-7は波高30.14cm, 周期3.0s, 図-8は波高26.23cm, 周期4.0sのケースである。周期が長い場合には、波形前半部の立ち上がりが急激になり、また反射波に対応する2山目が顕著になるという影響が見られるが、波圧最大値としては1.5倍程度の増加しか見られない。これは波長が長くなることにより、相対的に消波工の影響を受けにくいことを示している。

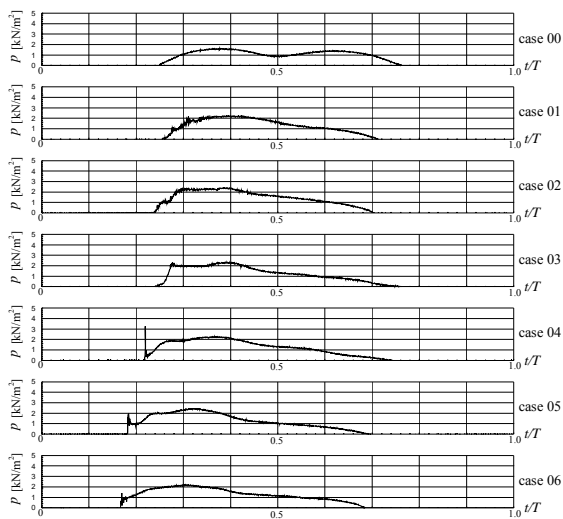


図-8(a) 静水面に設置した波圧計時系列
($H=26.23\text{cm}$, $T=4.0\text{s}$, 天端高を変えた場合)

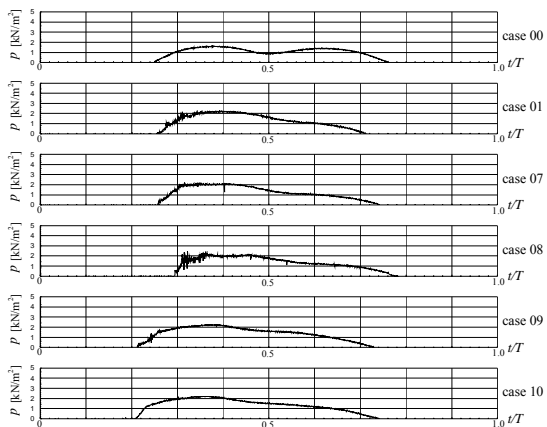


図-8(b) 静水面に設置した波圧計時系列
($H=26.23\text{cm}$, $T=4.0\text{s}$, 被覆厚を変えた場合)

3.3 静水面での波圧最大値に対する影響

次に、被覆状態が波圧最大値に対する影響について検討する。ここでの波圧最大値は波別解析後の波圧データの最大値の100波平均値である。なお、図-9に以下で用いる記号についての概略図を示す。

図-10に周期2.0sに関して、横軸 δz は完全被覆状態の天端高に対する割合を示し、 $\delta z=0$ が消波工無しの場合、 $\delta z=1$ が完全被覆状態のケースに対応する。また、縦軸は、消波工無しの状態に対する静水面での波圧増大率で、設計公式における λ_1 , λ_2 に対応するものである。

図には波高毎に分類して示しているが、どの波高においても $\delta z=0.5$ 程度で極大となり、完全被覆状態においては既往の設計で用いられる重複波圧のみ考慮した $\lambda_1=0.8 \sim 1.0$ ($\lambda_2=0$) になることが分かる。

入射波高の影響について見てみると、波高の小さい

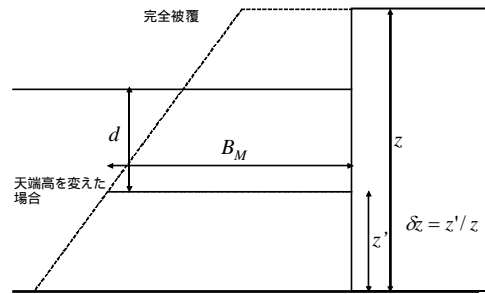


図-9(a) 天端高を変化させた場合の記号の定義

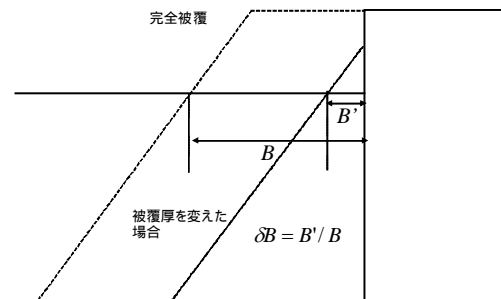


図-9(b) 被覆厚を変化させた場合の記号の定義

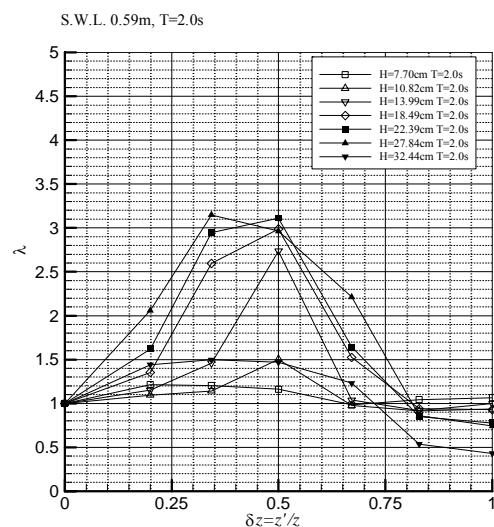


図-10 消波工天端高低下量と波圧増大率との関係
(周期2.0s)

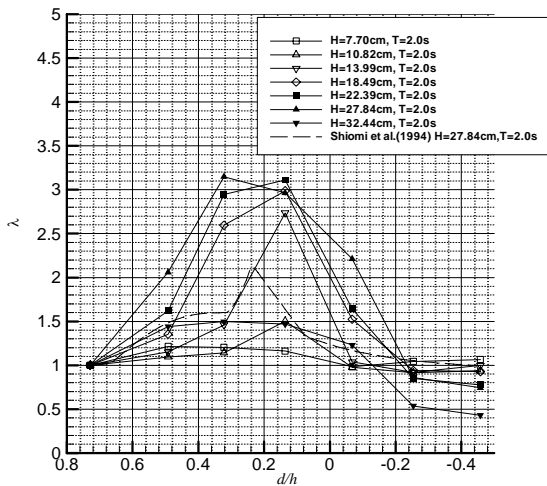


図-11 消波工天端水深と波圧増大率の関係
(周期2.0s)

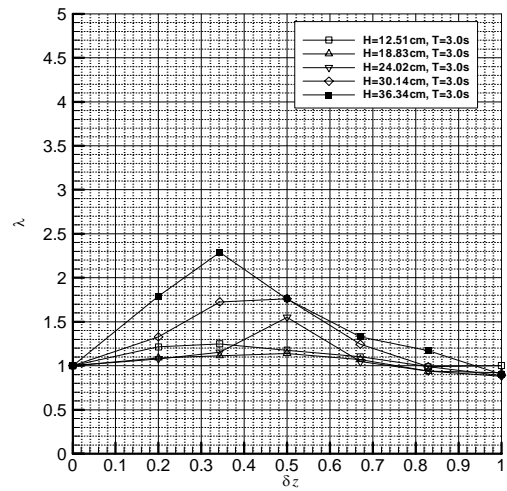


図-13 消波工天端水深と波圧増大率の関係
(周期3.0s)

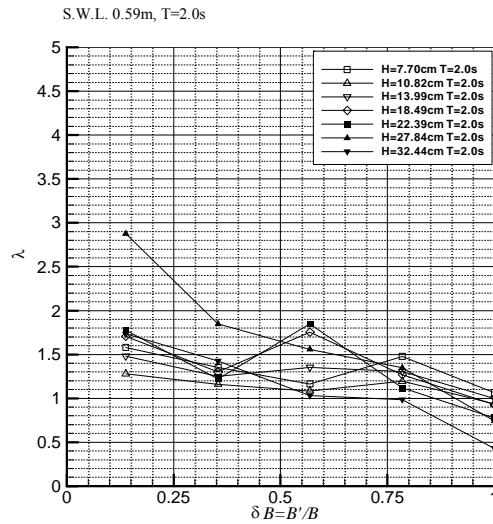


図-12 消波工被覆厚と波圧増大率の関係
(周期2.0s)

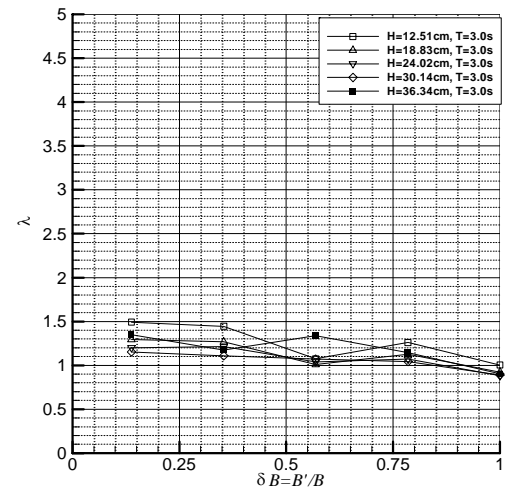


図-14 消波工被覆厚と波圧増大率の関係
(周期3.0s)

7.7cm, 10.82cmでは, 衝撃波圧は発生しておらず, 消波工無しの状態に比べて1.2~1.5倍程度の波圧最大値の増加である。しかし波高が大きくなるにつれて, 極値が鋭く立ち上りシャープな形状となる。ただし, $\lambda=3$ 程度(消波工無しの状態に比べて3倍程度)が上限値となり, その後は波高増大に伴い, グラフの形状が幅広くなる, つまり衝撃波圧の発生を引き起こす天端高の影響範囲が広くなることを表している。

なお, 図-11には塩見ら(1994)に対応するように横軸を静水面から消波工天端までの水深で処理し直したものを示す。また, 図-2に用いた波高27.84cm, 周期2.0sにお

る計算結果を示す。

図から分かるように, 塩見ら(1994)での方法と比較すると, 衝撃砕波が発生する領域(グラフの形状)は良く対応しているが, 値は全体的に過小評価となる。塩見ら(1994)の算定方法では, 平面不連続部を断面で分割することにより, 波圧算定のための断面形状を決定することになる。断面形状が決定すれば, 高マウンドの混成堤と同様な取り扱い方により波圧公式により波圧強度を算定することになる。

つまりこれは, 既存の設計波圧公式において衝撃波圧の発生領域(発生条件)は評価できていることを表して

いる．また，値が過小評価となる点であるが，衝撃波圧を考慮した設計波圧公式の基となった論文(谷本ら，1981，高橋ら，1992)の着目点がケーソンの滑動であり，滑動実験の結果に基づく滑動限界状態から作用波力を推定した結果に基づいたものであり，波圧としてはケーソンの滑動に影響を及ぼす成分を算定する公式となっている．本報告でのデータは単純に波圧計データでの静水面での作用波圧の最大値であり，ケーソン滑動に寄与する成分を取り出しているわけではないことが過小評価に見える原

因である．

図-12には，被覆厚を変化させた場合での影響を示す．縦軸は図-10，図-11と同様である．なお，横軸は静水面における水平方向の被覆厚 B' を示しており，完全被覆状態における静水面での被覆厚 B を基準に無次元化(δB)している．

天端高を変化させた場合と比較すると極値を持つことはなく被覆厚が薄くなるにつれて波圧が増大していく．天端高を変化させた場合で，衝撃波圧に伴うは波圧増大が顕著であったcase04(図-10中の $\delta z=0.5$ のデータ)とほぼ同数のブロック個数(つまり消波工の体積がほぼ同等)であるcase08(図-12中の $\delta B=0.57$ のデータ)では，消波工無しの状態に比べて1.5倍程度しか波圧が増大しておらず，使用ブロック個数，つまり消波工の体積のみでなく，その形状が波圧に対して大きな影響を及ぼすことが分かる．

図-13，14には周期3.0sのケースに関して，図-15，16には周期4.0sのケースについて同様の図を示すが，時系列で示したように被覆状態が波圧最大値に及ぼす影響は小さくなり，特に被覆厚を変化させた場合(図-14，16)では，被覆厚を変化させても一定値となっており，消波工の被覆状態が静水面の波圧最大値に対してほとんど影響していないことが分かる．

3.4 消波工の被覆状態と衝撃波圧発生条件

ここまで述べてきたように，消波ブロック被覆堤においては，その消波工が完成断面に対して不完全な状態になることにより衝撃波圧が発生する．この節では不完全被覆状態における衝撃波圧の発生条件について検討する．

(1) 天端高を変化させた場合

前節までで示したように，消波工の不完全被覆による衝撃波圧は，波高が大きくほど発生しやすく，また周期(波長)の影響も大きいことが分かっている．そこで，図-17には天端高を変化させた場合の衝撃碎波の発生に関して，横軸は天端幅を波長で無次元化して，縦軸は波高を天端上の水深で無次元化して示してある．今回の実験においては消波工の断面を一段ずつ変化させており，消波工の天端高と天端幅には負の比例関係にあり，図の横軸が大きくなるにつれて天端高が下がることを示している．なお，消波工の天端上の水深 d は正負どちらの値にもなり得るため，絶対値として処理している．

全体的に見れば衝撃碎波が発生する条件としては概ね縦軸が1を超えた場合に発生することになる．これは天端高が静水面に対して波高の幅だけ上下した領域に当たる場合に相当する．波長(周期)の影響を踏まえてみると，消波工天端幅と波長との比が大きくなるほど，つまり周

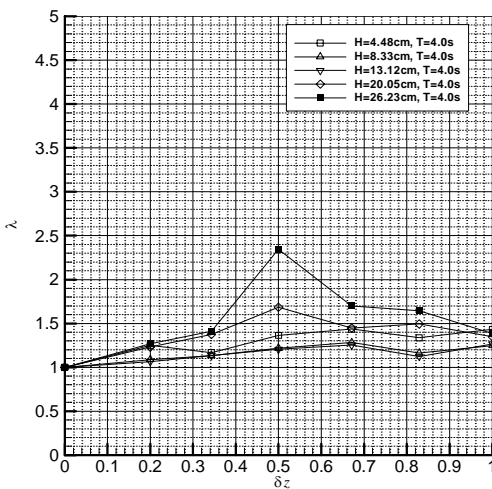


図-15 消波工天端水深と波圧増大率の関係 (周期4.0s)

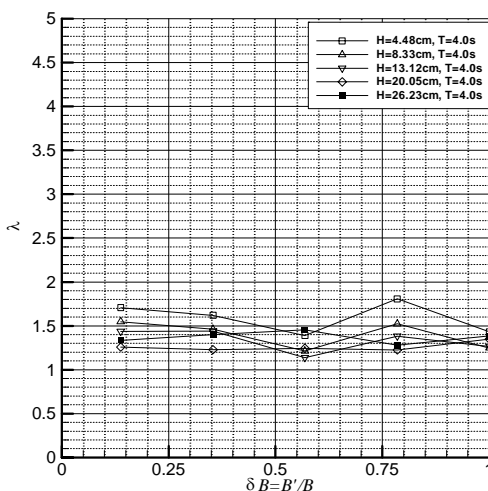


図-16 消波工被覆厚と波圧増大率の関係 (周期4.0s)

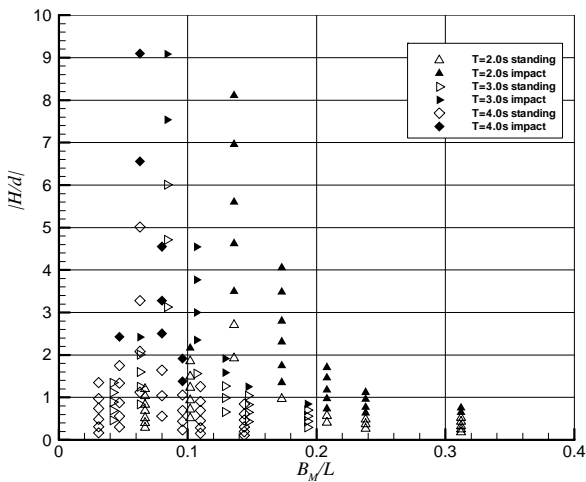


図-17 天端高を変化させた場合の衝撃砕波の発生条件

期(波長)が短いほど、また、天端高が低くなる(図では天端幅が大きいことに対応)ほど、小さい波高で衝撃波圧が発生しやすくなることを表している。

(2) 消波工の被覆面積による検討

次に、天端高を変化させた場合と被覆厚を変化させた場合とを併せて取り扱うため、消波工の体積による整理を行う。ここでは、横軸に完全被覆での被覆面積Aに対する割合を、縦軸には波高水深比で図を示す。図-18(a)は天端高を変化させた場合、図-18(b)は被覆厚を変化させた場合について示す。なお、横軸の0は消波工無し、1は完全被覆のデータを示している。

両者のグラフを見ると衝撃波圧が発生しているケースは、被覆面積の割合が0.6~0.7を頂点とする下に凸な領域として分類ができることが分かる。天端高を変えた場合と被覆厚を変えた場合とでは大きな差は無く、完全被覆の状態に対して被覆面積の割合が0.6~0.7の場合で衝撃砕波圧が発生しやすくなり、この時、波高水深比が0.2程度という小さい波高であっても衝撃砕波が発生することになる。

4. 規則波実験による静水面での波圧最大値の出現確率に関する検討

現在の信頼性設計において、確率的な評価を行う際の強力なツールとしてモンテカルロ法などによる数値シミュレーションが盛んにおこなわれてきているが、これらの手法を用いて構造物の安定性に関して確率的な評価を行う場合には、外力および耐力の確率分布の形状が与えられていなければならない。しかしながら、既往の研

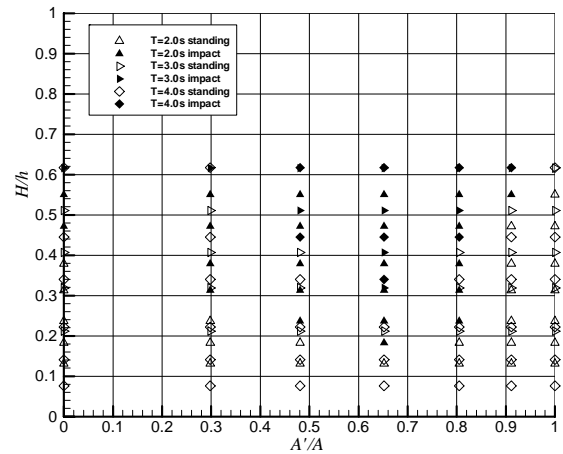


図-18(a) 天端高を変化させた場合の被覆面積と波高水深比による衝撃砕波の発生条件

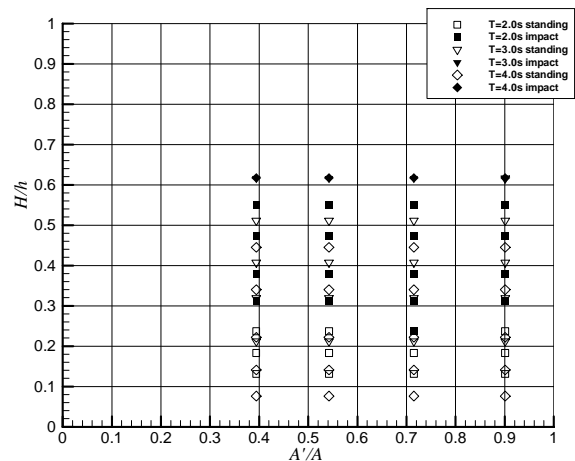


図-18(b) 被覆厚を変化させた場合の被覆面積と波高水深比による衝撃砕波の発生条件

究はあくまでの設計公式など一意の解を与えることを目的とした研究・データ解析であり、データのバラツキに関しては実験誤差として処理されている。

また、高橋ら(1983)に示されているように、衝撃波圧の発生は、砕波時および構造物作用時の波面の角度に依存する現象であり、砕波点および砕波時の波形の微小な差異が、衝撃波圧の発生の有無およびその時の作用波圧の大きさに大きく影響する。その結果として規則波実験においても、波圧最大値は大きく変動する。

そこで、本章では前章で示した規則波による実験データに関して確率的な検討を行う。

4.1 入射波高に対する波圧最大値の平均値について
まず、入射波高に対する波圧最大値の平均値の挙動に

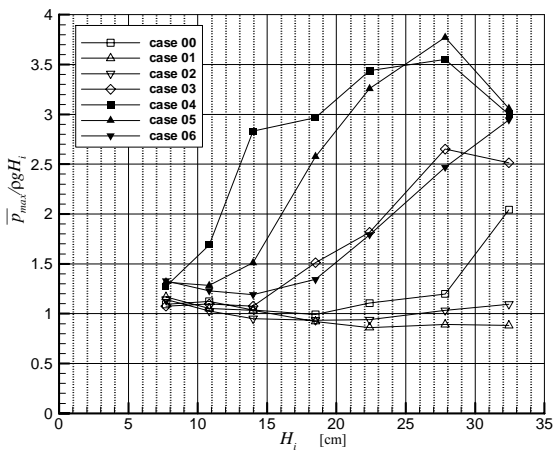


図-19 天端高を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 2.0s

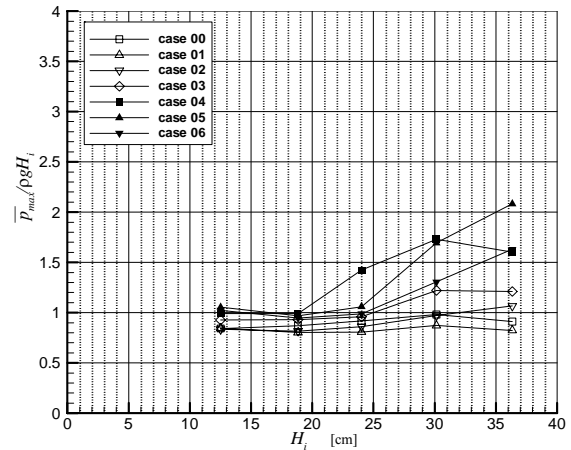


図-21 天端高を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 3.0s

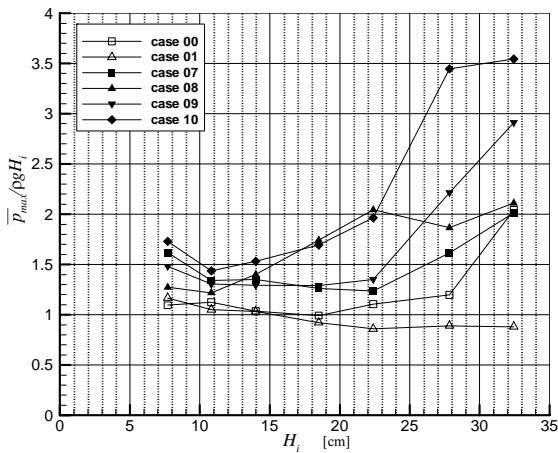


図-20 被覆厚を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 2.0s

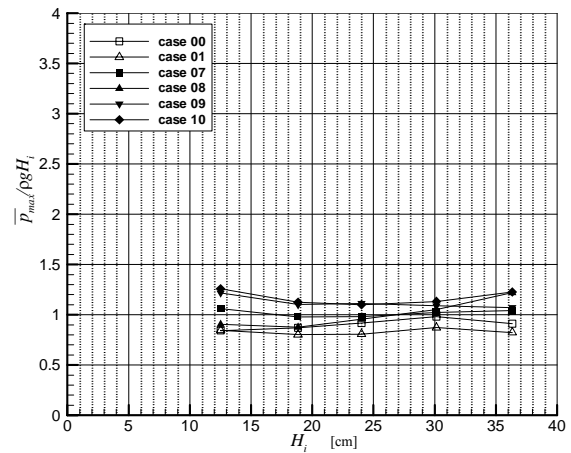


図-22 被覆厚を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 3.0s

ついて示す．図-19には，周期2.0sのケースについて横軸を入射波高，縦軸を入射波高($\rho g H_i$)で無次元化した波圧最大値の平均値を示す．

図から明らかなように，完全被覆状態および衝撃砕波が発生しないケースであるcase01，case02に関しては波高で無次元化した場合に一定値となっており，波高に比例する波圧強度となっていることが分かる．また，一定値はほぼ1.0であることから $\rho g H_i$ の波圧が作用していることになる．

一方で，不完全被覆状態でかつ衝撃砕波の発生しているcase03～case06においては，波高で無次元化した波圧最大値が波高に比例，つまり波圧最大値自体は波高の2乗に比例していることが分かる．これは設計公式中の衝撃波圧に関する波圧係数 α^* 中の α_{10} (式(6))に示されているよう

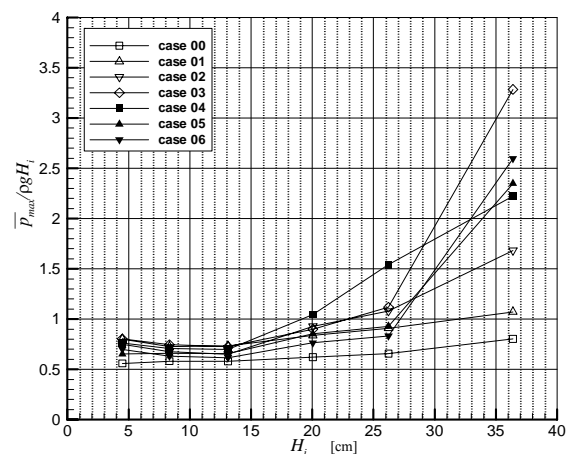


図-23 天端高を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 4.0s

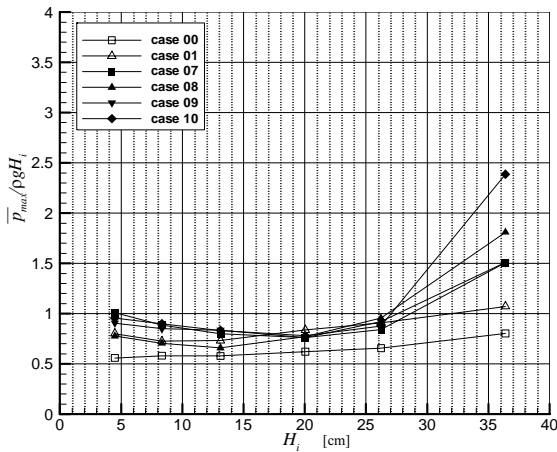


図-24 被覆厚を変化させた場合の入射波高と波圧増大の関係について：周期 4.0s

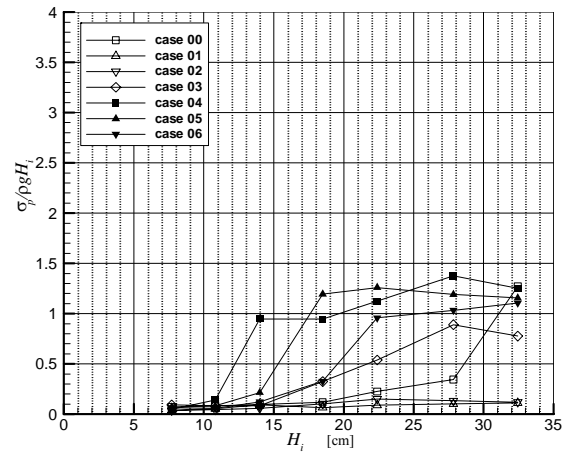


図-25 天端高を変化させた場合の入射波高と標準偏差の関係について：周期 2.0s

に、衝撃波圧係数が波高に比例することを対応している。

図-20には被覆厚を変化させた場合についてまとめたものを示すが、被覆厚が小さいcase09, case10では波高の大きいケースで衝撃砕波の発生に伴い、急激な波圧増大が見られるが、その他のケースでは、概ね1.3~2.0程度で一定値となっていることが分かる。波高で無次元化したデータが一定値の挙動を示しており、被覆厚が薄くなる状態では波圧増大は起こるものの、波圧最大値は波高に比例し、被覆厚は比例係数に影響していることを表している。

図-21, 22には周期3.0sのケースに関して、図-23, 24には周期4.0sに関するデータの図を示す。天端高を変化させた場合、例えば図-21の周期3.0sのデータではcase04, case05において波高の2乗に比例する傾向が見られるが、周期2.0sと比較してその影響は小さい。また被覆厚を変化させた場合では、ほぼ完全に一定値となっており、周期2.0sのケースと同様に、波圧最大値は波高に比例する傾向を示しており、その比例係数は被覆厚が薄くなるにつれて増加していく。

4.2 標準偏差と変動係数について

次に衝撃砕波発生時における標準偏差と変動係数について示す。標準偏差の値は平均値同様に、波高で無次元化しており、変動係数は、標準偏差の値を平均値で除した値である。

図-25に、周期2.0sに関する標準偏差のデータを、図-26には変動係数の図を示す。平均値を示した図-19と対応させて見てみると、衝撃砕波が発生するケース、特にcase04, case05において顕著であるが、波圧最大値がある値(今回の実験では波高で無次元化した波圧最大値が2.0程度)を超えた場合に標準偏差が急激に大きくなり、その後は波

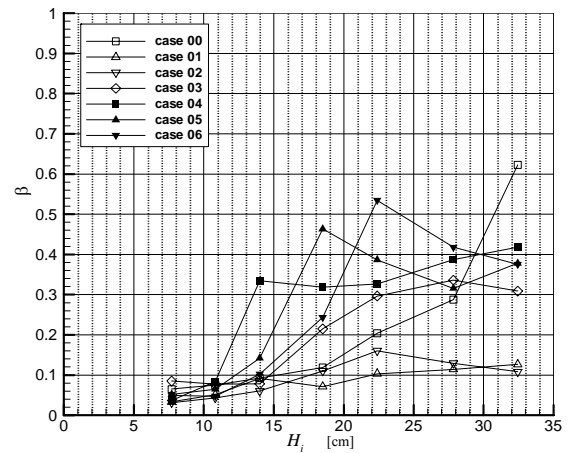


図-26 天端高を変化させた場合の入射波高と変動係数の関係について：周期 2.0s

高を大きくしても、標準偏差を波高で無次元化した値は一定値となる傾向が分かる。つまり、標準偏差の値が波高に比例していることを示している。

このとき、変動係数は0.1程度から0.3~0.5に上昇する。通常モンテカルロ法など、確率論に基づき海岸構造物を設計する際に、波圧・波力に関する変動係数の標準値として0.1が用いられる(下迫ら, 2006)。その標準値は消波工が完全被覆状態であれば妥当な結果であることが分かる。しかし変形後もしくは平面不連続部など、消波工が不完全被覆の状況に対しては変動係数を0.3~0.5程度まで大きくして検討を行う必要があることが分かる。

図-27に被覆厚を変化させた場合についての標準偏差を、図-28にはその時の変動係数の図を示す。被覆厚を変化させた場合は、今まで述べてきたように、標準偏差・変動係数ともに、天端高を変化させた場合に比べて小さ

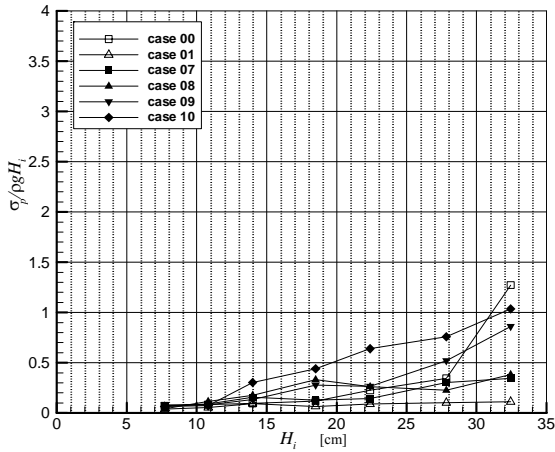


図-27 被覆厚を変化させた場合の入射波高と標準偏差の関係について：周期 2.0s

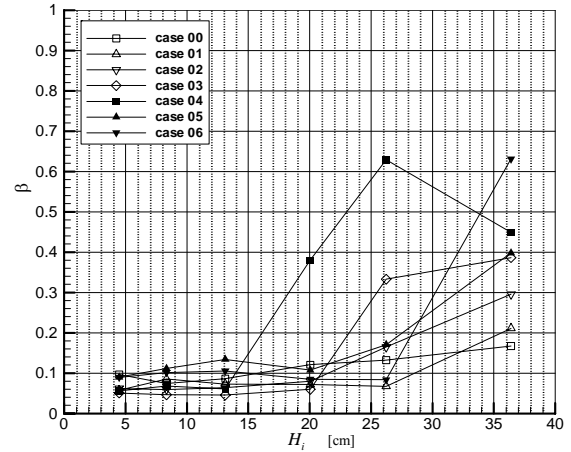


図-29 天端高を変化させた場合の入射波高と変動係数の関係について：周期 3.0s

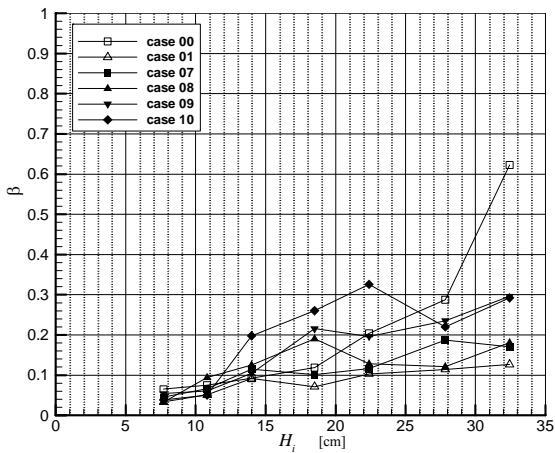


図-28 被覆厚を変化させた場合の入射波高と変動係数の関係について：周期 2.0s

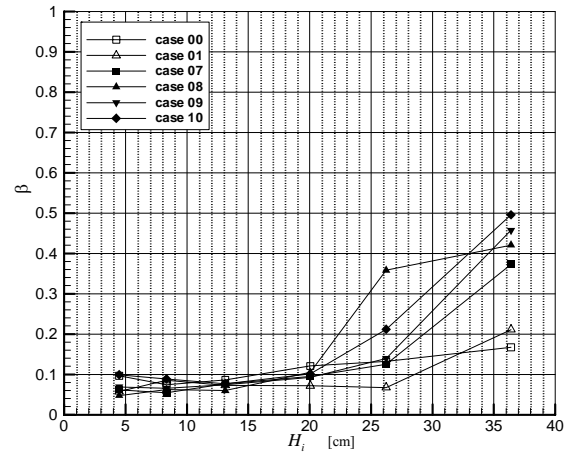


図-30 被覆厚を変化させた場合の入射波高と変動係数の関係について：周期 3.0s

いもの変動係数としては0.2～0.3程度に上昇していることが分かる。

図-29, 図-30には周期4.0sの実験データにおいて入射波高と変動係数の関係について示す。波圧最大値の平均値(図-23, 図-24)に関して周期が長くなることにより, 消波工被覆状態の影響を受けにくくなっていたが, 変動係数に関しては周期が長いほど大きいことが分かる。特に周期4.0sで天端高を変化させたケース(図-30)では変動係数が0.6程度まで上昇していることが分かる。また, 周期が長いケースでは完全被覆状態であるcase01においても入射波高に比例して変動係数が上昇していく。

4.3 出現確率分布について

波圧最大値の出現確率分布の分布形状について検討す

る。確率分布の算定には100波のデータを用いており, 図化にあつては横軸を平均値で無次元化している。

まず, 図-31に以下に示す代表的なケースでの通過波高の出現確率分布を示すが, すべてのケースにおいてほぼ正規分布であり, かつ同じ分布形状になっていることが確かめられる。

図-32には, 波高27.84cm, 周期2.0sでの完全被覆状態(case01), 天端が一段下がったcase02, 天端を3段下げたcase04について波圧最大値の出現確率分布を示す。

衝撃碎波の発生していないcase01およびcase02では分布形状は正規分布とよく一致している。また, 図中の縦の破線は, 塩見ら(1994)の手法による算定結果を示しており, 実験結果の平均値に対して0.8程度となる。

一方で, 衝撃碎波の発生するcase04を見ると, 分布形状

は正規分布に対してかなり幅の広い分布となっており、また、平均値に対して0.8程度の位置に極値を持つ偏った分布形状へと変化する。

このとき、平均値の1.5倍を超える最大値が10%程度発生することが分かる。塩見ら(1994)による算定結果は実験の平均値に対して0.4となり、超過確率としてみると100%になる。塩見ら(1994)の算定結果が過小評価となるが、これは先に述べたようにケーソンの滑動に影響を及ぼす波圧を算定するための方法であるからであるが、ケーソン本体の破壊など部材の破壊に対しては注意が必要であり、塩見らによる算定結果の5倍程度の波圧が作用する場合があります。

図-33には、波高はほぼ同等で、周期が異なるケース(波高26.23cm, 周期4.0s)について同様の図を示す。周期2.0sの時と同様に、衝撃砕波の発生しないケースでは正規分布に一致する形状となるが、衝撃砕波発生時には小さい側に偏った分布形状になっていることが分かる。塩見ら(1994)の算定結果は平均値に対して1.0~1.5程度の算定結果となっている。これは周期が長い場合は作用波圧がケーソンの滑動に直接的に結びつくことと対応する。

5. 結論

本報告では、消波ブロック被覆堤の消波工の被覆状態に着目して、規則波による波圧実験を実施し、被覆状態が波圧に及ぼす影響について調べることを目的として、検討を行った。主要な結論は以下に示すとおりである。

- 1) 天端高を変化させた場合は、消波工の天端高が静水面近傍および静水面下にある場合に、静水面における波圧が増大し、衝撃波圧が発生する。これは塩見ら(1994)による結果と同様である。
- 2) 衝撃砕波発生時は、静水面における波圧は波高の2乗に比例する。その時の波圧最大値の大きさは消波工無しの状態に比べて3倍程度の値となる。
- 3) 被覆厚を変化させた場合は、天端高を変化させた場合に比較して、消波工の状態の影響は小さく、静水面においては衝撃砕波がほとんど発生しない。
- 4) 被覆厚を変化させた時は衝撃砕波がほとんど発生せず、波圧最大値は波高に比例する。また、その比例係数は被覆厚の影響を受ける。
- 5) 周期が長い場合は、波長が長くなり相対的に構造物の影響を受けにくくなることから、消波工の被覆状態の影響はより小さくなる。

また、波圧最大値の出現確率分布を検討することにより以下の結論を得た。

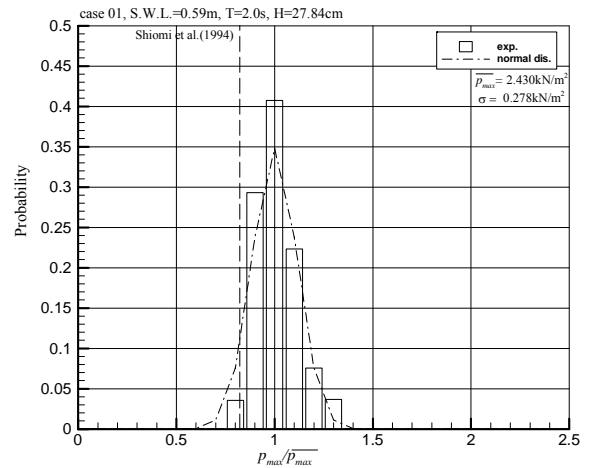


図-32(a) 波圧最大値出現確率分布
完全被覆状態(case01)

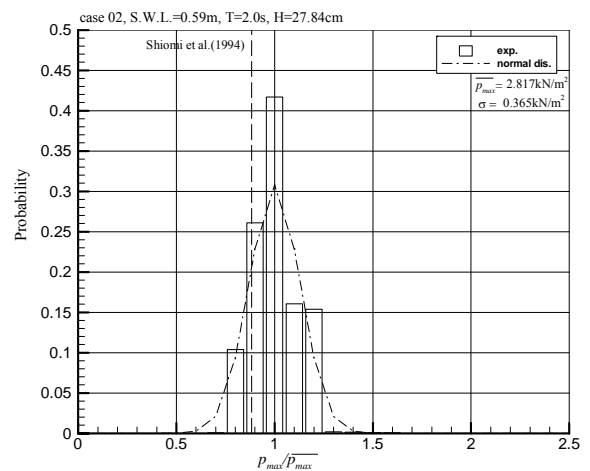


図-32(b) 波圧最大値出現確率分布
Case02

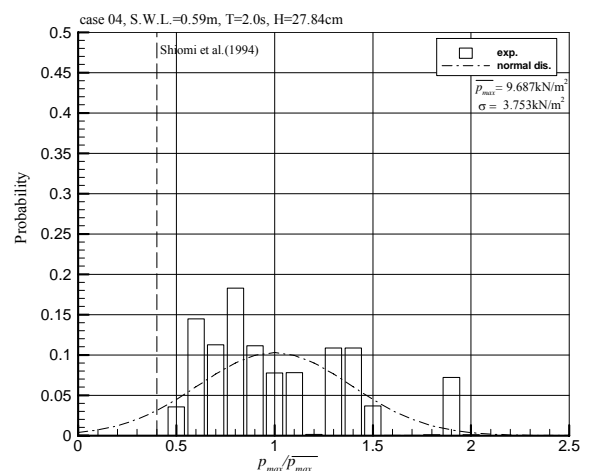


図-32(c) 波圧最大値出現確率分布
Case04

- 6) 波圧最大値の標準偏差は、波高の増大に伴い波圧最大値が閾値($2\rho g H_i$)を超えた場合に急激に大きくなるが、その後は波高に対して一定値となる。
- 7) 変動係数は、完全被覆状態においては既往の標準値として示されている0.1であるが、被覆状態を変化させ衝撃砕波が発生する場合には、0.3～0.5程度に上昇する。

今後の課題としては、断面形状、波浪条件を変えた実験、および平面不連続部を対象とした実験を行うことにより、消波工の不完全被覆状態における波圧、もしくは波力に対する汎用性の高い式もしくは図表を提案することが挙げられる。そのためには不規則波による実験データとの比較も必要になる。また、衝撃波圧の発生確率の検討、および波圧最大値の出現確率分布形状に対する理論的考察を行うことにより、堤体に作用する外力を確率的に表現することが挙げられる。

さらに、近年開発が進められている数値波動水槽と実験データとの比較を行うことにより、数値波動水槽の耐波性能設計への適用性の検討も行う必要がある。

6. あとがき

本研究は、消波ブロック被覆堤における消波工の被覆状態を統一的に変化させ実験を行ったものであり、施工途中から、変形後の断面までを想定し、施工から供用期間中までを踏まえた構造物の耐波性能設計に対して必要な要素である。特に今回の成果は消波工の変形が起こっている既設の消波ブロック被覆堤の安全性に関する情報を与えるものとなり、復旧・メンテナンスへの指標となり得るものである。

また、今後の海岸構造物の耐波性能設計が、より高度な、変形を考慮した設計法へと進んでいくための基礎的データとして重要になる。その際には、既往の公式や数値波動水槽で与えられる一意の解に対して、確率的な表現が求められることになる。

本研究は消波ブロック被覆堤の消波工断面の変形に着目したものであり、変形後の性能を把握すること、外力の確率的特性を把握することは、被覆材、ケーソン本体など、その他の構造物に対しても考慮・検討すべき内容であり、本資料は、その第一報としての位置付けられる。

(2009年4月21日受付)

謝辞

本実験の実施にあたり、海洋水工部耐波研究チームのメンバーである鈴木智恵、鷺崎誠両研究官の多大な協力

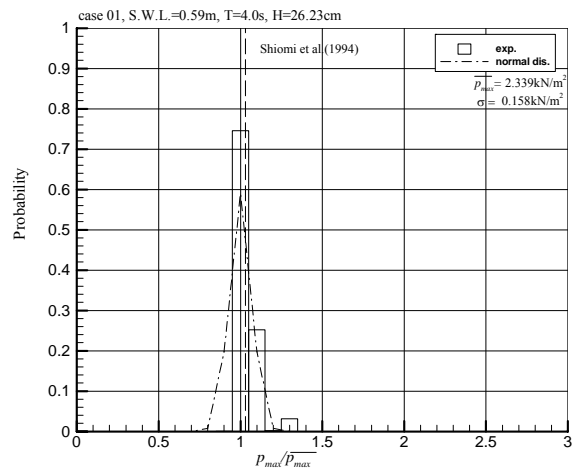


図-33(a) 波圧最大値出現確率分布
完全被覆状態(case01)

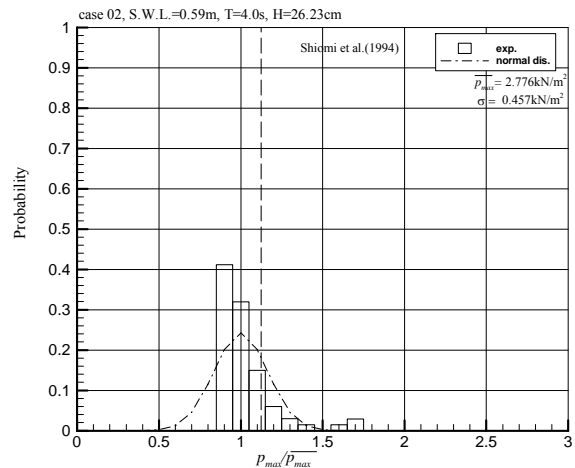


図-33(b) 波圧最大値出現確率分布
Case02

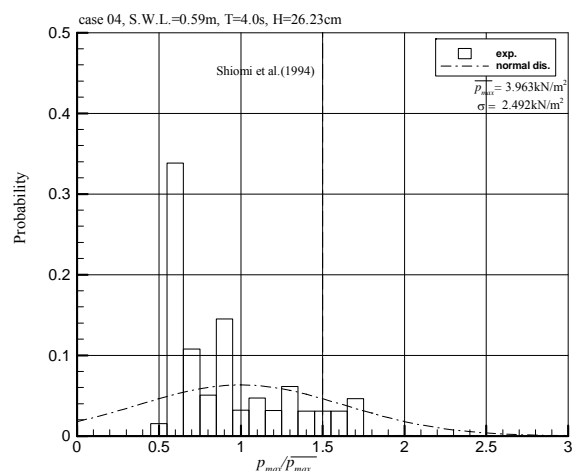


図-33 (c) 波圧最大値出現確率分布
Case04

を得ている．ここに記して感謝の意を表する次第である．

港湾技術研究所報告，第20巻，第2号，pp.3-40．

参考文献

鴻上雄三・時川和夫(1970)：施工段階における消波工の波
 圧減殺効果に関する実験的研究，第17回海岸工学講
 演会論文集，pp.205-210．
 合田良實(2008)：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，
 鹿島出版会，430p．
 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄
 (1995)：消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に
 関する現地調査 海岸工学論文集 第42巻 pp.901-905.
 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求(1997)：
 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現
 状調査(第2報) -消波ブロックの法尻沈下災害-，
 海岸工学論文集，第44巻，pp.961-965.
 下迫健一郎・高橋重雄(1998)：期待滑動量を用いた混成防
 波堤直立部の信頼性設計法，港湾技術研究所報告，
 第37巻，第3号，pp.3-30．
 下迫健一郎・大寄菜々子・中野史丈(2006)：滑動量を要
 求性能に設定した混成堤の信頼性設計法，港湾空港
 技術研究所報告，第45巻，第3号，pp.3-24．
 鈴木高二朗・高橋重雄(1998)：消波ブロック被覆堤のブ
 ロック沈下に関する一実験 -マウンドとブロック
 下部の洗掘-，海岸工学論文集，第45巻，pp.821-825.
 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司(1983)：直立壁に作用する
 衝撃波圧の発生機構に関する一考察，港湾技術研究
 所報告，第22巻，第4号，pp.3-32．
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992)：
 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提
 案，海岸工学論文集，第39巻，pp.676-680.
 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗
 (2000)：台風9918号による護岸の被災とその対策に
 関する水理模型実験，港湾技研資料，No.973，50p．
 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤崎秀可(1994)：防波堤
 の信頼性設計に向けて，港湾技研資料，No.785，36p．
 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄(1981)：混成防波堤のマ
 ウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について，

記号表

A	:	完全被覆状態における消波工被覆断面積
A'	:	不完全被覆時の消波工被覆断面積
B	:	完全被覆状態における静水面での被覆厚
B'	:	被覆厚を変えた時の静水面での被覆厚
B_M	:	消波工天端もしくは被覆ブロックの幅
d	:	消波工の天端もしくは被覆ブロック上の水深 (静水面より鉛直下向きが正)
d_p	:	高橋ら(2000)による算定手法における衝撃波圧作用範囲
g	:	重力加速度
h	:	堤体前面の水深
h_b	:	堤体前面から $5H_{1/3}$ 沖側地点の水深
h_B	:	上部工天端高 (静水面より鉛直上向きが正)
h_C	:	消波工天端高 (静水面より鉛直上向きが正)
h_c	:	ケーソン天端高 (静水面より鉛直上向きが正)
H_D	:	設計波高
L_D	:	設計波長
M	:	消波工の質量
p	:	波圧
p_1	:	静水面における設計波圧
$w_0 = \rho g$:	水の単体間重量
z	:	完全被覆状態における消波工被覆高さ
z'	:	天端高を変えた時の消波工被覆高さ
α_1	:	重複波圧の波圧係数
α_2	:	砕波波圧の波圧係数
α_l	:	衝撃波圧の波圧係数
α^*	:	砕波圧もしくは衝撃波圧の波圧係数
β	:	変動係数
λ	:	消波工無しの波圧に対する波圧増大率
λ_1, λ_2	:	構造形式に応じた補正係数
θ	:	波向き
ρ	:	水の密度
σ_p	:	波圧最大値の標準偏差

ブシネスクモデルを用いて算定したリーフ上護岸の設計諸元 に関する考察

平山 克也*・春尾 和人**・宮里 一郎***

要 旨

一般に、護岸の天端高は、沖合より波浪変形計算等を行って換算沖波波高等の設計諸元を算定した後、合田(1975)による越波流量算定図を用いて推定される越波流量が、対象となる護岸背後の利用状況や重要度に応じて決められた許容越波流量を超えないように決定する。しかし、沖縄周辺の海域は、浅瀬やリーフ地形といった複雑な海底地形が発達しているため、単純に合田の越波流量算定図を適用することが難しく、このような設計諸元の算定法を確立することが長年の課題となっている。

宮国ら(2008)は、リーフ地形をモデルとした断面越波実験を行い、リーフ上の短周期波高をもとに、リーフ上の砕波等による平均水位上昇量や、サーフビートに伴う水位変動量を設計潮位に考慮した上で、合田の越波流量算定図を適用する方法を提案し、算定値が実験値と非常に良く一致することを示した。ただし、この適用にあたっては、リーフ上のこれらの波浪諸元を何らかの方法で精度良く見積もることが不可欠である。

そこで、本研究では、浅瀬やリーフといった複雑な海底地形での波浪変形特性を精度良く計算できる最新のブシネスクモデル(NOWT-PARI, Ver5.3)を用いて、リーフ上護岸の設計諸元を算定する方法を提案した。すなわち、リーフ周辺の複雑な海底地形による屈折や浅水変形、およびリーフ上の砕波や遡上等を考慮して、リーフ上護岸前面の波高分布を算定した。また、同時に計算される砕波等による平均水位上昇量およびサーフビートに伴う水位変動量を算定して、リーフ上護岸前面の設計水深の設定法を示した。さらに、この設計水深とリーフ上護岸前面波高を用いて、設計換算沖波を算定した。

このようにして算定したリーフ上護岸前面の設計諸元を現地へ適用することにより、複雑な波浪変形が生じるリーフ上護岸においても合田による越波流量算定図が利用可能となり、適切な設計を行うことができる。

キーワード：ブシネスクモデル，リーフ，越波量，護岸設計，平均水位上昇，サーフビート

* 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チームリーダー

** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム研究官

*** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム研修生

CONTENTS

1. Influence on Wave Pressures of Wave-Dissipating Block state on Breakwater with Wave-Dissipating Block Layer
..... Katsumi SEKI, Taro ARIKAWA, Masahiro MIZUTANI 3
2. Evaluation of Design Wave Condition for Seawall on Coral Reef Calculated in Boussinesq-type Wave Transformation Model
..... Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO, Ichiro MIYAZATO 23